

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШИРИНЫ ОКНА ДПФ НА ИНФОРМАТИВНОСТЬ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ ФУНКЦИИ НА ВЫХОДЕ КОРРЕЛЯТОРА ПРИ АНАЛИЗЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

Фаерман В.А. Черемнов А.Г.

Томский политехнический университет
faermanvlad@mail.ru

Решение широкого круга инженерных задач (таких как, например, диагностика эксплуатационного состояния технических объектов) требует эффективных методов анализа сигналов. Данное утверждение обуславливается, прежде всего тем, что для решения подобных задач необходимым является оценка значения некоторого информативного параметра, непосредственное измерение которого невозможно в силу влияния шумов [1]. Примером может служить задача определения местоположения утечек корреляционно-акустическим методом в трубопроводах, находящихся под давлением.

Суть упомянутого метода заключается в следующем. Пьезоэлектрические датчики вибрации устанавливаются (непосредственно на поверхность трубы) на обоих концах линейного участка трубопровода, на котором наблюдается утечка. Место истечения среды под давлением является источником акустической эмиссии и воспроизводит сигнал, который фиксируется обоими датчиками. При этом, различие в фазовых характеристиках сигналов, фиксируемых на концах обследуемого участка трубопровода, может быть использовано для определения местоположения течи [2].

Для анализа сигналов полученных описанным способом и определения местоположения утечки используется математический аппарат корреляционного анализа. Практически возможны различные варианты реализации корреляторов, однако в последнее время наиболее распространенным способом реализации является программный. Последнее объясняется с одной стороны значительным удешевлением микропроцессорных устройств, наблюдающимся в последнее время, и непрерывным продолжающимся увеличением их вычислительных возможностей. В современных реализациях цифровых корреляторов, вычисление корреляционной функции, как правило, осуществляется через дискретные преобразования Фурье (ДПФ) на основании теоремы о корреляции описанной в [3]. При этом, основным параметром, задаваемым при вычислении и оказывающем влияние на результат является ширина окна преобразования Фурье (N_0). Под шириной окна преобразования Фурье понимают количество отсчетов оцифрованных сигналов, одновременно используемых при вычислении корреляционной функции. Также, данный параметр можно

интерпретировать как продолжительность единовременно анализируемых сигналов

$$T_0 = \frac{N_0}{f_d},$$

где f_d - частота дискретизации, T_0 - продолжительность сигналов.

Стоит отметить, что вычисление корреляционной функции связано с выполнением большого объема вычислительных операций, даже несмотря на применение теоремы о корреляции [4]. В связи с этим, для вычисления прямого и обратного ДПФ применяют алгоритм быстрого преобразования Фурье. Особенностью последнего является то, что он накладывает дополнительные ограничения на ширину окна преобразования -

$$N = 2^n,$$

где $n > 2$, n - целое.

Как отмечалось выше, N оказывает влияние на эффективность анализа, так как способствует ослаблению широкополосного шума за счет увеличения количества частотных отсчетов в спектре сигнала [4]. В тоже время, увеличение N приводит к нелинейному увеличению количества необходимых вычислительных операций ($12N_0 \cdot \log_2 2N + 8N$) [3]. Последнее делает актуальным исследование влияния ширины окна преобразования Фурье на качество производимого анализа.

Далее кратко описывается задача обнаружения течи корреляционно-акустическим методом. Пусть датчики в течении времени T фиксируют мгновенные значения виброакустических сигналов в равноотстоящие на Δ ($\Delta = 1/f_d$) моменты времени. Тогда в любой дискретный момент времени t_i ($i = 0, 1, \dots, N-1$, где N - общее число отсчетов) сигнал, фиксируемый первым датчиком, может быть представлен как

$$\xi_1(i) = s_0(i - j_1) + n_1(i),$$

где $n_1(i)$ - шумовая составляющая сигнала первого датчика; $j_1 = \tau_1/\Delta$ - запаздывание сигнала первого датчика. Аналогично, для второго датчика

$$\xi_2(i) = s_0(i - j_2) + n_2(i).$$

Корреляционная функция может быть вычислена как

$$r_{12}(j) = \frac{1}{N_0} F^{-1}(F[\xi_1(i)] \cdot F^*[\xi_2(i)]), \quad (2)$$

где F - прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ); F^{-1} - обратное ДПФ; F^* - комплексно-сопряженное представление результата ДПФ; $i = 0, 1, \dots, N_0 - 1$; $N_0 \leq N$. Далее по виду

коррелограммы определяется максимум $r_{12}(j)$, который соответствует значению

$$j_0 = j_2 - j_1 = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\Delta}$$

и может служить для определения оценки параметра $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$, который в свою очередь используется для вычисления местоположения утечки.

В качестве альтернативы описанному методу корреляционного анализа может быть применен частотно-временной подход к корреляционному анализу, описанный в [6]. Применение указанного подхода позволяет ценой большого количества дополнительных вычислений повысить помехоустойчивость метода [7], а также получить более наглядную и удобную для дальнейшего исследования поверхность частотно-временной корреляционной функции. [6] При этом, актуальность выбора и обоснования оптимального параметра N_0 сохраняется.

В связи с тем, что непосредственный анализ продолжительных сигналов за счет увеличения N_0 на практике не представляется возможным в силу ограниченности памяти и нелинейном характере зависимости объема вычисления от ширины окна, приобретает актуальность применение альтернативных способов подавления шумов на выходе коррелятора, за счет полного использования накопленных данных. Таким способом является когерентное усреднение [5] корреляционных функций, вычисленных для различных окон БПФ одинаковой ширины. Практически, корреляционный анализ с применением когерентного усреднения корреляционных функций описывается выражением

$$r_{12}(j) = \frac{1}{N_0} \cdot \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} F^{-1}(F[\xi_1(i)] \cdot F^*[\xi_2(i)]), \quad (1)$$

где K - количество окон БПФ шириной N_0 , представленных в исходной выборке сигналов. Тожественным (1), но более приемлемым с точки зрения реализации является выражение

$$r_{12}(j) = \frac{1}{N_0} \cdot \frac{1}{K} \cdot F^{-1} \left(\sum_{k=0}^{K-1} (F[\xi_1(i)] \cdot F^*[\xi_2(i)]) \right).$$

Стоит отметить то, что когерентное усреднение отрезков сигнала во временной области позволяет улучшить отношение сигнал/шум только в том случае, когда начальная фаза отрезков сигнала совпадает [5]. Однако применительно к рассматриваемой задаче, фаза корреляционной функции не зависит от начальной фазы сигналов [3] и условие применимости когерентного усреднения выполняется.

В таблице приводятся некоторые результаты исследования влияния N_0 на информативность (относительно минимального) частотно-временной корреляционной функции, полученной в результате анализа $N = 2^{16}$ отсчетов исходных сигналов. Тестовые сигналы генерировались в

ППП Mathcad (отношение сигнал/шум -20 дБ). Для оценивания информативности использовался подход, описанный в [8].

Таблица. Влияние ширины окна

№	Ширина окна	Информативность
1	$N_0 = 2^{10}, K = 64$	1,000
2	$N_0 = 2^{12}, K = 16$	1,894
3	$N_0 = 2^{14}, K = 4$	3,270
4	$N_0 = 2^{16}, K = 1$	4,846

В соответствии с таблицей могут быть сделаны следующие выводы: 1) основой при выборе N_0 является вычислительный потенциал располагаемого устройства; 2) в связи с тем, что на практике анализируемые сигналы представлены несколькими сотнями тысяч отсчетов (до 10 с, при $f_d = 44,1$ кГц), не имеет смысла выбор $N_0 > 2^{16}$; 3) так как N_0 определяет разрешающие способности по времени и частоте, имеет смысл $N_0 > 2^{10}$.

Список использованных источников

1. Каневский И.Н., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пос. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
2. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход: 2-е изд. : пер. с англ. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
3. Фирсов А.А., Терентьев Д.А. Алгоритм повышения точности локации при корреляционном течеискании, основанный на анализе фазы взаимного спектра // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 8. – С. 23-27.
4. Черемнов А.Г. Способы повышения эффективности вычисления быстрого преобразования Фурье [Электронный ресурс] // Интернет журнал Науковедение. – 2013. – № 3. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/16n313.pdf>. – С. 1-6.
5. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: второе изд. – М.: Бинум-Пресс, 2006. – 656 с.
6. Чан В.Т. Частотно-временной корреляционный анализ в задачах определения координат утечек в трубопроводах / В.Т. Чан, В.С. Аврамчук, В.И. Гончаров // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – №. 2. – С. 70-73.
7. Фаерман В.А. Применение когерентного анализа для повышения информативности частотно-временной корреляционной функции // Молодёжь и современные информационные технологии: сб. трудов XII межд. научно-практ. конф., 12-14 ноября 2014 г. – 2014. – Т. 1. – С. 98-99.
8. Фаерман В.А. Количественная оценка информативности корреляционного анализа при решении задач локации источника сигнала // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сб. трудов VII всеросс. научно-практ. конф., 25-26 марта 2015 г. – 2015. – С. 203-205.